

지반하중조건에 따른 숏크리트 거동의 수치해석적 검증

유광호, 정지성, 박연준 (수원대학교)

본 논문은 터널의 지반-지보재 상호 거동을 규명하기 위한 연구로서 주지보재인 숏크리트의 균열, 파괴하중 및 변형거동을 실물크기의 갱도모형실험을 통해 확인하고 3차원 수치해석을 실시하여 각각의 결과를 비교·검증하였다. 갱도모형 실험은 실제 터널과 유사한 크기의 터널을 제작하여 11개 실린더에서 축압조건에 따라 하중을 가하여 실험을 수행하였다. 3차원 수치해석 모델링은 갱도모형실험과 가능하다면 같은 조건으로 해석하기 위하여 모형실험으로부터 로드셀 및 LVDT를 통해 얻은 하중-변위곡선이 수치해석 시에도 재현되도록 하여 수행되었다.

1. 서 론

근래에 국내에는 지하시설물 특히, 터널구조물에 대한 건설수요와 관련된 연구가 활발하였다. 이에 터널공사에 대한 경제적이고 합리적인 설계 및 시공의 필요성이 더욱 중요하게 되었다. 터널구조물의 설계에 있어서 중요한 것은 굴착으로 인한 지반응력의 변화 및 거동을 정확히 파악하여 반영하는 것이다. 하지만 종래의 터널에 대한 설계 및 시공관리는 경험이 많은 기술자들에 의하여 판단되는 경우가 많았다. 최근의 컴퓨터 및 수치해석법의 급속한 발달로 터널과 같은 지하구조물의 안정성 해석이 가능하며 특히 터널의 안전율을 수치해석적으로 구하는 방법이 제한된 바 있다(유광호 등, 2000).

지반의 파괴뿐만 아니라 지보재의 파괴도 터널의 안정성에 큰 영향을 미치므로 터널의 내공변위를 억제하고 소성영역의 발생을 방지하는 지보재의 파괴도 함께 고려되어야 한다.

특히, 굴착 후 즉시 타설되는 1차 지보재인 숏크리트의 정확한 설계를 위해서는 지반과 숏크리트의 상호거동이 고려되어야 한다. 이러한 지보재의 파괴가 고려된 터널의 안전율을 산정하는 방법으로 허용응력 설계법에 기초하여 숏크리트 내에 발생하는 응력이 허용응력을 초과하면 숏크리트가 파괴된다고 가정하고 전단강도 감소기법을 이용하여 지반과 숏크리트의 파괴를 고려한 안전율을 구하는 방법이 유광호 등(2005)에 의해 제시되었다. 또한 축압계수(K_0)에 따라 변화하는 거동특성을 실험을 통하여 비교하고 이에 대한 지반특성에 맞는 터널을 설계 할 수 있도록 해야 한다.

본 논문에서는 터널의 안전율을 보다 정확히 산정하기 위해 갱도모형실험과 이에 대한 수치해석적 검증을 통하여 숏크리트의 파괴거동을 규명하고자 한다.

2. 갱도모형실험

2.1 장비의 제작 및 제원

지반에 굴착된 터널의 주 지보재인 슛크리트의 파괴거동을 규명하기 위해 그림 1과 같이 실제 터널과 유사한 크기(폭 3.3m, 높이 2.9m, 깊이 0.5m)의 마제형 터널을 제작하여 실험하였다. 또한, 실제 터널의 하중전달 메카니즘과 유사한 등분포 하중전달을 위해 슛크리트 배면에 30cm 두께의 모래로 뒤채움을 하였다. 그리고 등분포하중을 효과적으로 가할 수 있도록 그림 1과 같이 총 11개의 가압장치를 통해 하중을 가하였다. 가압실린더 11개는 천단부(④,⑤,⑥,⑦,⑧)와 측벽부(①,②,③,⑨,⑩,⑪)로 나누어서 측압계수에 따라 하중전달 메카니즘을 재현할 수 있도록 설계, 제작되었다. 실린더 전면은 하중을 최대한 실제 터널과 같이 등분포하중으로 재하하기 위하여 $\phi 30\text{cm}$ 의 브라켓을 장착하였다. 또한, 슛크리트와 실린더 전면의 브라켓 사이에 뒤채움재인 모래를 30cm 두께로 타설하여 슛크리트에 균등한 하중이 재하 되도록 하였다.

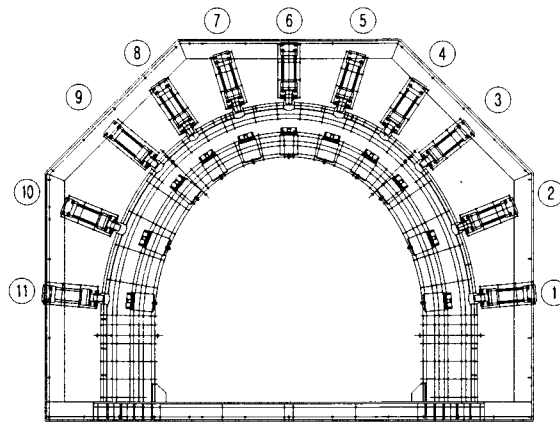


그림 1. 모식도 및 하중재하장치 위치

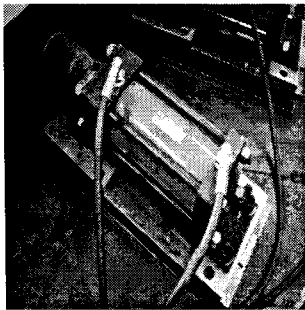
유압실린더가 마주보는 방향의 슛크리트 배면에 로드셀을 설치하여 슛크리트 배면에 발생하는 하중을 측정하였다. 이 로드셀에서 읽히는 하중으로 측압계수를 수동 조절할 수 있게 하였다. 슛크리트와 로드셀 사이에는 우레탄 spacer를 사용하여 슛크리트 곡면부에 발생하는 응력을 일정하게 하였다.

갱도모형실험의 장비 제원은 표 1과 같으며 지보재인 슛크리트의 거동을 파악하기 위해 균열의 발생 시기, 위치 및 작용하중을 측정하고 내공변위는 50mm 용량의 LVDT 4개, 100mm 용량의 LVDT 7개, 총 11개의 LVDT를 슛크리트의 방사방향으로 측정하였고 유압 실린더, 로드셀, LVDT는 모두 바닥 철판면으로부터 슛크리트 깊이의 중심인 바닥에서 25cm 높이에 설치하였다.

표 1. 갱도모형 실험장비 제원

장 비	제 원
유압실린더	$\phi 125\text{mm}$, 20ton (최대 25ton)의 용량, 11EA
로드셀(load cell)	$\phi 200\text{mm}$, 20ton의 용량, 11EA
LVDT	100mm×7EA
	50mm×4EA

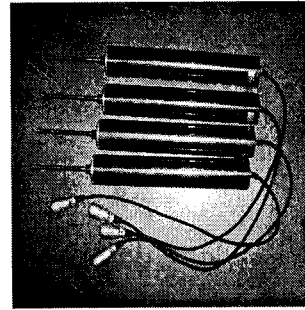
갱도모형실험을 구성하는 장비의 제원은 그림 2에 나타난 바와 같다. 그림 2의 (a)는 유압실린더, (b)는 로드셀, (c)는 LVDT를 나타낸 것이며, 갱도모형실험은 바닥면에서 수행되도록 설계되었으며, 바닥면의 마찰효과를 최대한 줄이기 위해 약 20cm 높이에 철판을 깔고 그 위에서 수행되도록 설계되었다. 또한 인버트의 슛크리트 양단부를 고정시켰으며 가압 시 슛크리트가 연직방향으로 들리는 것을 방지하기 위하여 들림 방지봉을 채결하여 하중재하시 슛크리트가 들리는 것을 방지하였다.



(a) 유압실린더



(b) 로드셀



(c) LVDT

그림 2. 갱도모형 실험장비

스�크리트는 강섬유 보강 슛크리트를 사용하였으며 강섬유량은 45kgf/m^3 , 배합비는 일반적으로 현장에서 많이 적용되는 값을 사용하였다(유광호 등, 2007). 콘크리트 혼합기(concrete mixer)를 사용하여 기계 혼합하고 타설한 후에는 진동 다짐기를 사용하여 다짐하였다. 실험을 위해 슛크리트는 10cm의 두께로 타설하여 28일간 양생하였다.

유압실린더를 통해 하중이 가해지면서 슛크리트가 취성파괴를 일으키는 것을 방지하고 유압실린더에 걸고루 하중이 분포될 수 있도록 하중재하속도를 5kgf/sec 정도로 가능하면 아주 천천히 수동으로 유압을 조절하였다.

하중재하를 위해 그림 3과 같이 11개의 유압실린더가 사용되었고, 본 논문에서는 반시계 방향으로 ①부터 ⑪까지의 실린더 번호를 부여하여 서술하였다. 하중재하는 천단부 5개(④, ⑤, ⑥, ⑦, ⑧), 좌·우 측벽부의 6개(①, ②, ③, ⑨, ⑩, ⑪)의 유압실린더를 각각 2셋트로 연결하여 유압조절을 쉽도록 하였고, 로드셀에서 측정되는 하중을 모니터링하면서 지반응력 상태를 측압계수가 1.0과 0.5가 되도록 유압장치를 조절하여 실험을 수행하였다.

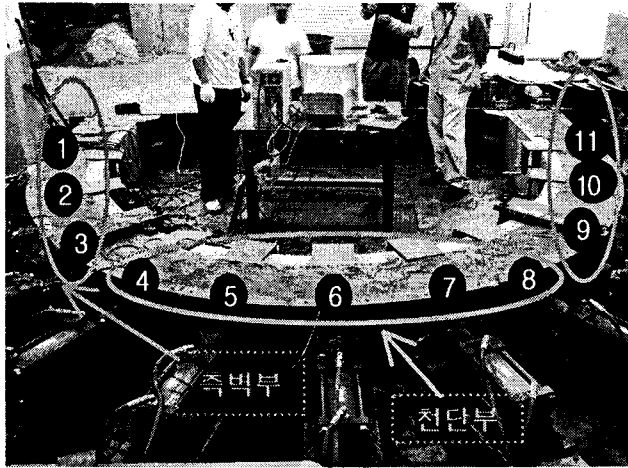


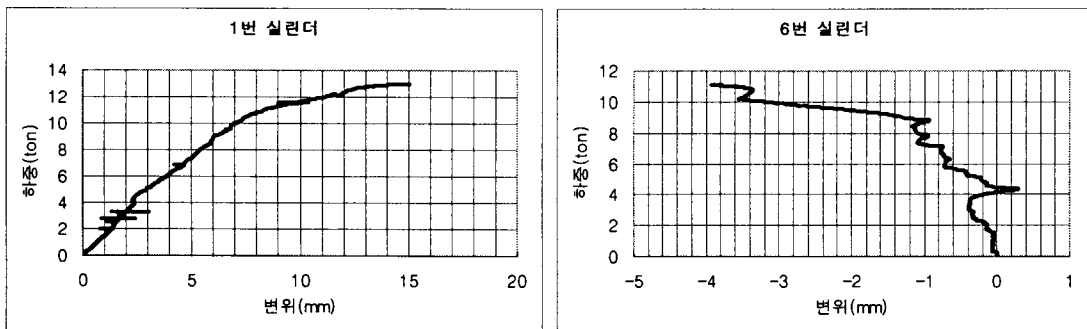
그림 3. 11개 실린더를 사용한 갱도모형 실험 전경

2.2 갱도모형실험 결과 및 정리

2.2.1 축압계수 1.0

축압을 1.0으로 하여 11개의 유압실린더를 사용한 갱도모형실험이 진행됨에 따라 실린더 ①에서 최초로 균열이 발생하고 ⑪→②→②/③→⑦번에 이어 최후로 ①번에서 균열이 확대되어 파괴되었으며, 이때 하중은 약 13ton 정도였다. 크랙 발생 순서를 살펴보면 측벽부에서 최초 크랙이 발생해 천단부 방향으로 이동 후 최종적으로 측벽부에서 파괴가 일어난 것을 알 수 있다. 이로써 축압계수가 1.0일 때에는 측벽부의 하중이 숏크리트의 거동과 파괴에 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 실험에서의 얻은 하중-변위 곡선을 그림 4와 같이 측벽부, 천단부로 나타냈다. 그림 4의 (a)와 같이 측벽부에서는 하중이 13ton일 때 내측으로 약 15mm의 변위가 발생하였고, 그림 4의 (b)와 같이 천단부에서는 하중이 약 11ton일 때 외측으로 약 4mm정도의 변위가 발생한 것으로 나타났다.

모형실험의 변위 양상을 보면 그림 5와 같이 축압계수가 1.0 즉, 수직방향과 수평방향으로 동일한 하중을 가했을 때 수평방향, 즉 측벽부가 내측으로 들어가고 천단부가 외측으로 밀리는 현상을 볼 수 있으며 어깨부에서 내측과 외측으로의 변곡점이 생기게 된다.



(a) 측벽부

(b) 천단부

그림 4. 하중-변위 곡선 ($K_0=1.0$)

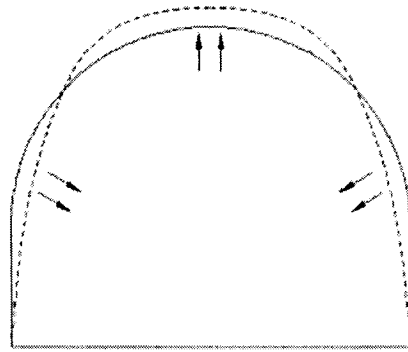


그림 5. 측압에 따른 갱도 모형실험의 변위 양상($K_0=1.0$)

2.2.2 측압계수 0.5

측압계수(K_0)를 0.5로 하여 실험한 결과 균열 발생 순서를 보면 표 2에 나타낸 것과 같이 천단부 크랙 → 측벽부 크랙 → 천단부 파괴로 나타났다. 이러한 크랙발생순서는 측압계수가 1.0일 때의 측벽부 크랙 → 천단부 크랙 → 측벽부 파괴와는 다른 것을 알 수 있는데 측압계수의 영향에 따라 천단부의 하중이 측벽부의 하중보다 2배 크기 때문에 천단부가 취약한 것을 알 수 있다.

표 2. 크랙 발생 순서

크랙 발생 순서	하중(ton)	발생 위치
1	8.3	6번 실린더 (천단부)
2	9.4	2번, 3번 실린더 중앙 (측벽부)
3	9.5	10번 실린더 (측벽부)
4	9.8	2번, 3번 실린더 중앙 (측벽부)
5	10.2	11번 실린더 아래 (측벽부)
6	10.2	1번 실린더 아래 (측벽부)
7	11.7	10번 실린더(크랙증가) (측벽부)
8	12.4	2번, 3번 실린더(크랙증가) (측벽부)
9	13.3	1번 실린더 아래(크랙증가) (측벽부)
10	13.3	7번 실린더 (천단부)
11	13.8	완전파괴

하중-변위 곡선은 그림 6과 같이 측벽부와 천단부로 나누어 나타내었다. 그림 6의 (a)와 같이 측벽부에서는 하중이 약 7ton 일 때 내공변위가 외측으로 30mm 가량 발생하였고, 그림 6의 (b)와 같이 천단부에서는 하중이 약 14ton 일 때 내공변위가 내측으로 48mm 가량 발생한 것을 알 수 있었다.

모형실험의 변위 양상을 보면 그림 7과 같이 측압계수가 0.5일 때 천단부의 하중으로 인

해 측벽부가 외측으로 밀리고 천단부는 내측으로 들어오는 현상이 발생한 것을 알 수 있다.

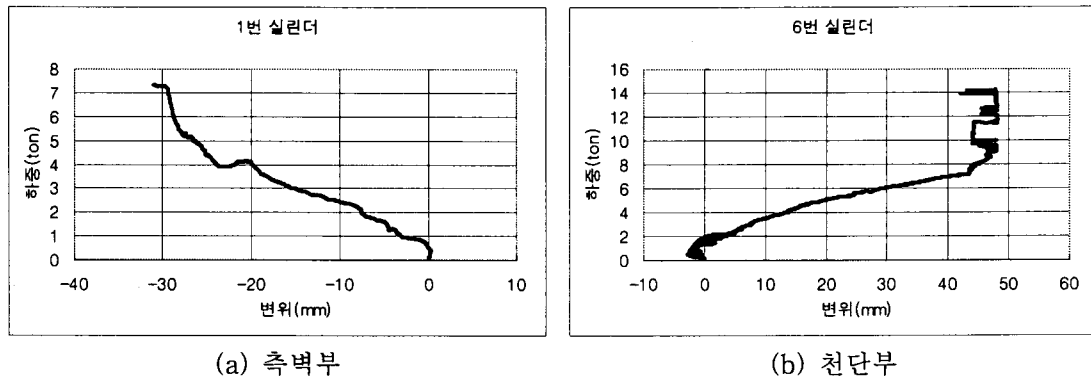


그림 6. 하중-변위 곡선 ($K_0=0.5$)

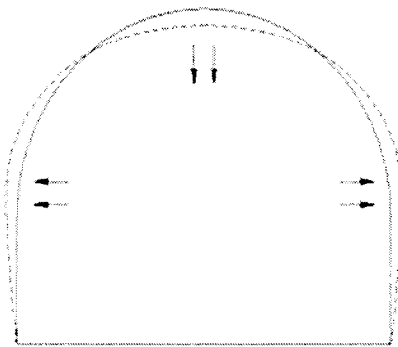


그림 7. 측압에 따른 갱도모형실험 변위양상($K_0=0.5$)

3. 수치해석적 검증

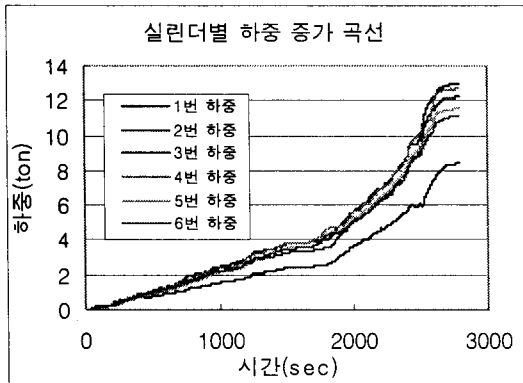
본 논문에 사용된 프로그램은 Itasca Consulting Group Inc.에서 개발한 지반해석용 프로그램인 FLAC-3D ver. 3.10이다. FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua)은 유한 차분법에 근간을 둔 프로그램으로 구조 요소 및 interface 요소를 사용하여 지반 및 지중 구조물의 다양한 해석이 가능하도록 되어 있다(Itasca Consulting Group, 2006).

모형실험 결과를 동일한 조건으로 수행된 3차원 수치해석 결과인 슛크리트의 거동을 중심으로 비교 검증하였다.

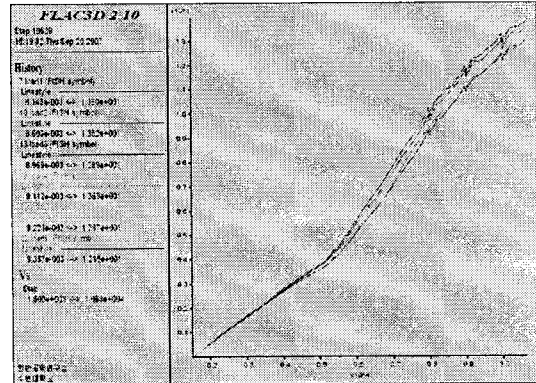
3.1 해석 개요

해석 모델링은 갱도모형 실험과 같은 조건으로 해석하고 해석결과를 실험결과와 비교·검증 하고자 하였다. 해석 지보재 슛크리트가 좌·우 대칭이므로 해석 시간을 줄이기 위해 반단면 해석을 수행하였다. 슛크리트는 shell 요소로 모델링하였으며 실험과 마찬가지로 인버트 부분의 슛크리트 양단부는 고정시켰다. 슛크리트인 shell 요소와 뒷채움재의 경계면은 일체로 거동하는 것으로 가정하였다. 갱도모형 실험 시 측벽부 한 셋트, 천단부 한 셋트로 묶여있기 때문에 유압이 동시에 균일하게 증가하지 않고 개별적으로 차이를 보이는 문제가

발생하였다. 이에 각각의 유압실린더별 로드셀에서 읽히는 하중이 다르게 되었는데 수치해석에서는 실험 시의 상황을 정확하게 모사할 수 있도록 실험시의 실린더별 하중을 그림 8과 같이 실제와 유사하게 실험시의 하중 증가 곡선을 얻을 수 있도록 각각의 하중재하속도를 조절하였다.



(a) 갱도모형실험 시

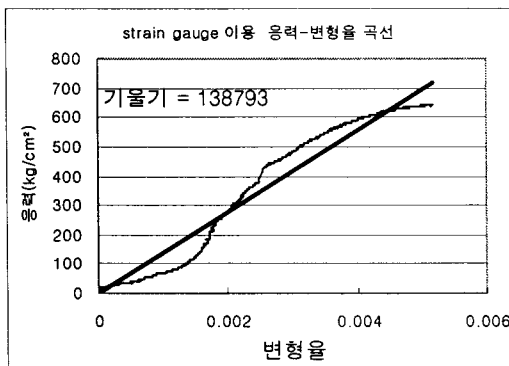


(b) 수치해석 시

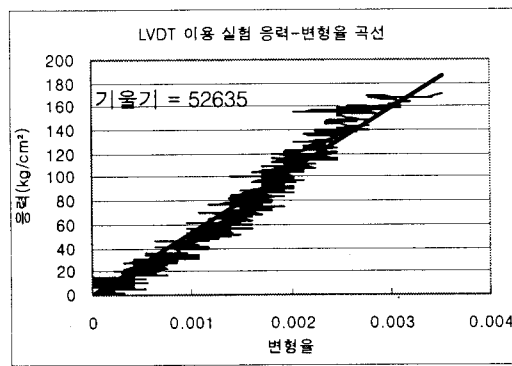
그림 8. 하중 증가 곡선

3.2 수치해석 입력강도 정수

수치해석적 검증에 필요한 슛크리트의 탄성계수와 포아송비를 알기 위해 갱도모형실험 후 슛크리트를 지름 5cm, 길이 10cm로 공시체를 제작하여 일축압축시험을 하였다. 탄성계수를 구하기 위해 스트레인게이지 및 LVDT를 이용한 방법이 사용되었다. 그림 9와 같이 스트레인게이지를 이용한 실험에서는 탄성계수가 13.9GPa, LVDT를 이용한 실험에서는 탄성계수가 5.3GPa이 측정되었다. 하지만 LVDT를 이용한 방법은 공시체의 양단면에 미소균열 등으로 인해 약간의 깨짐 현상이 발생해 변위가 크게 측정되어 변형율이 증가한 것으로 판단되어 스트레인게이지를 이용한 결과값인 13.9GPa을 수치해석 시 사용하였다.



(a) Strain gauge를 이용한 경우



(b) LVDT를 이용한 경우

그림 9. 탄성계수 측정을 위한 응력-변형률 곡선

수치해석에 사용된 입력강도정수는 표 3 및 표 4와 같이 실내실험을 통해 얻은 값들을

기준으로 가능하면 실제 실험 결과와 일치하도록 조정하였다.

표 3. 슛크리트 입력강도정수

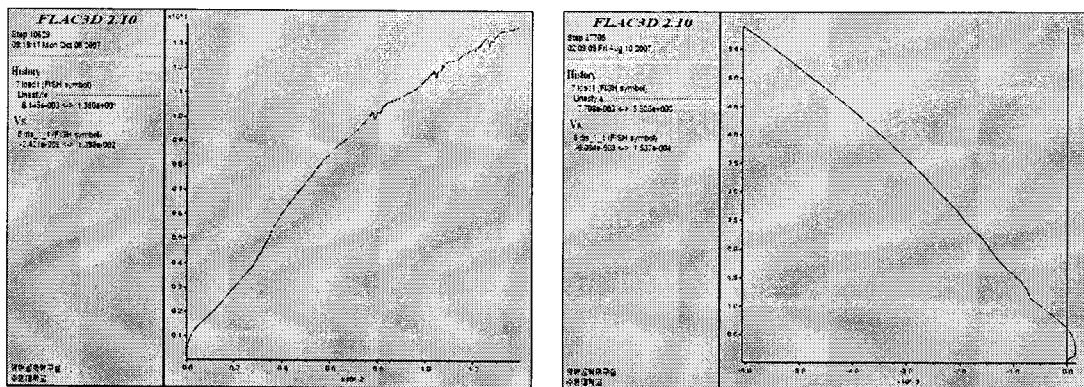
탄성계수 (GPa)	포아송 비	두께 (cm)	단위중량 (kg/m ³)
13.9	0.2	10	2,300

표 4. 뒤펀재 입력강도정수

탄성계수 (GPa)	포아송비	점착력 (MPa)	단위중량 (kg/m ³)	내부마찰각 (deg)	인장강도 (MPa)
0.025	0.3	0.008	2,000	35	0.004

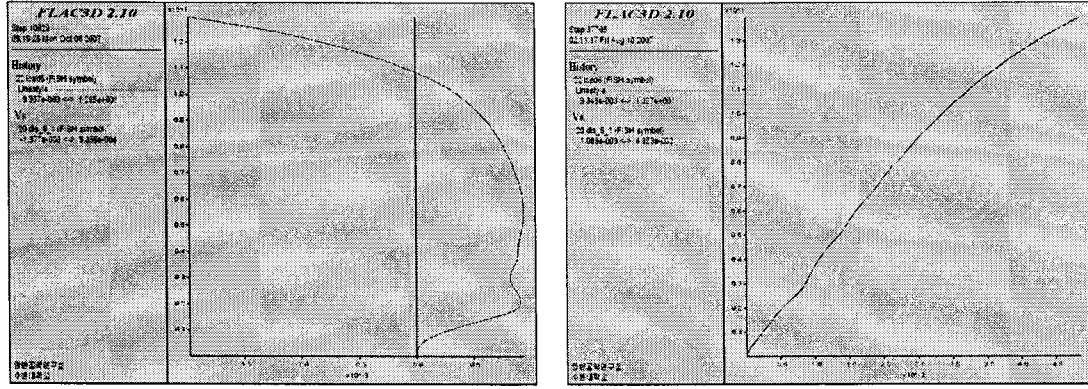
3.3 수치해석 결과 정리 및 비교

측압계수(K_0)가 1.0과 0.5인 경우 측벽부의 하중-변위 곡선은 그림 10과 같다. 그림 10의 (a)와 같이 측압계수가 1.0 일 때의 하중-변위 곡선은 측벽부에서 약 14mm 정도 발생하여 실제 실험과 매우 유사하게 나왔다. 그림 10의 (b)와 같이 측압계수가 0.5일 경우 측벽부의 변위는 외측으로 발생하며 그 양은 6mm 정도로 실제 실험보다 과소하게 나온 것을 알 수 있다. 천단부의 변위량은 실제 실험과 매우 유사한 수치해석 결과가 나왔는데 측벽부 변위가 실제 실험보다 적게 나온 것은 실험에서 슛크리트 타설시 슛크리트의 다짐이 제대로 이루어지지 않아 측벽부분에서 균질하지 못한 상태이고 측벽부 아래 인버트 부분이 다른 부분에 비해 약하여 변형이 많이 발생하여 나타난 결과라고 판단되어진다. 수치해석 시 최대압축응력의 발생위치는 2번 실린더가 위치한 곳으로 나타났으나 실험 시 천단부의 최초 크랙 발생 위치와는 차이가 있었으므로 이는 보다 정밀한 연구가 수행 되어야 할 것이다.



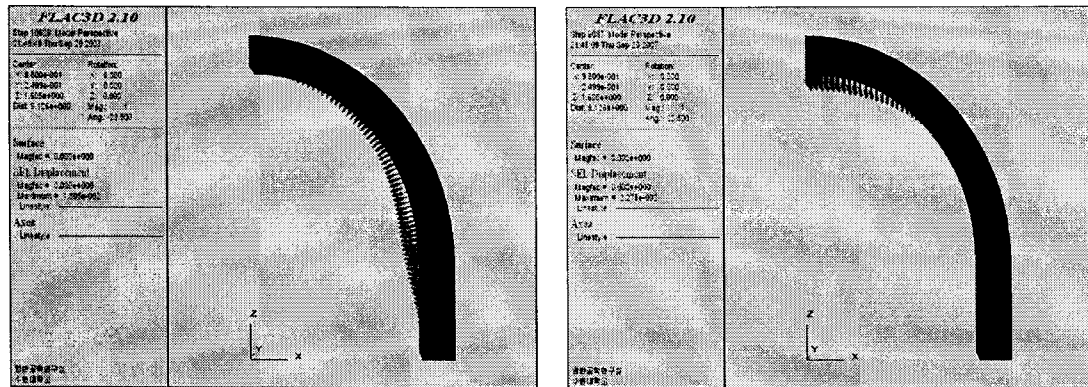
(a) 측압계수(K_0) 1.0 (b) 측압계수(K_0) 0.5
 그림 10. 측압계수에 따른 측벽부의 하중-변위 곡선

그림 11은 축압계수에 따른 천단부의 하중-변위 곡선을 나타낸다. 그림 11의 (a)는 축압이 1.0인 경우로서 천단부의 변위는 약 2mm 정도 발생한 것으로 나타났다. 실제 실험에서는 약 3.5mm 정도 변위가 나타났는데 약 1.5mm의 근소한 차이를 보여주고 있다. 그림 11의 (b)와 같이 축압계수가 0.5일 경우 수치해석 시 48mm 정도가 발생하였고, 실제 실험에서 발생한 변위 48mm와 일치하는 값을 알 수 있다.



(a) 축압계수(K_0) 1.0 (b) 축압계수(K_0) 0.5
그림 11. 축압계수에 따른 천단부의 하중-변위 곡선

3차원 수치해석 결과를 축압에 따라 나타낸 슛크리트의 변위벡터도를 그림 12와 같이 도시하였다. 그림 12에서 알 수 있듯이 축압계수가 1.0인 경우 변위가 천단부는 상향으로 약간 발생하였고, 측벽부는 터널 안쪽으로 변위가 발생하여 실제 모형실험과 유사한 거동을 보이고 있다. 또한 축압이 0.5인 경우는 천단부의 변위가 하향으로 발생하고 측벽부는 바깥쪽으로 발생하여 축압에 의한 거동을 실험과 유사하게 보여주고 있다.



(a) 축압계수(K_0) 1.0 (b) 축압계수(K_0) 0.5
그림 12. 축압에 따른 슛크리트의 변위 벡터도

4. 결론

본 연구를 통해 터널의 주 지보재인 숏크리트의 파괴거동을 규명하기 위해 실제 터널과 유사한 크기의 마제형 터널을 제작하여 갱도모형실험을 수행하고 3차원 수치해석에 의해 검증하였다. 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

3차원 수치해석을 통해 갱도모형실험을 유사하게 모사할 수 있었고, 축압계수에 대한 영향을 비교 검토하였다. 축압계수가 1.0과 0.5는 숏크리트의 변위양상이 상반되게 발생하였다. 또한 축압계수가 1.0일 때는 갱도모형실험과 수치해석의 천단부 및 측벽부의 변위가 거의 일치하는 것으로 나타났으나, 축압계수가 0.5일 때는 천단부의 변위는 일치하게 발생하였지만 측벽부의 변위는 수치해석에서 훨씬 적게 예측되었다. 이는 실험에서 숏크리트 타설시 다짐이 제대로 이루어지지 않아 숏크리트의 인버트 부분이 다른 부분에 비해 약하여 변형이 많이 발생했기 때문인 것으로 판단된다.

한편 숏크리트의 탄성계수값은 LVDT를 이용하여 구한 경우와 스트레인 게이지를 이용하여 구한 경우가 각각 5.3GPa, 13.9GPa로 다르게 나타났다. 이 것 또한 숏크리트의 다짐이 불량하여 균질하게 타설되지 못했기 때문에 발생한 것으로 판단된다.

따라서 향후 추가 실험 시에는 숏크리트의 거동을 보다 정확히 규명하기 위해 숏크리트 타설 시 균질한 다짐이 선행되어야 한다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부의 건설기술개발사업을 위한 연구지원(04핵심 CO1)에 의해 수행된 결과의 일부로서 관계기관에 깊은 감사드립니다.

참고문헌

1. 유광호, 박연준, 배규진, 2000, 연약암반층에 굴착된 터널의 안전을 평가, 터널기술논문집, Vol. 2, No. 3, pp.47~57.
2. 유광호, 박연준, 홍근영, 이현구, 김재권, 2005, 지보재 파괴를 고려한 터널 안전율의 수치해석적 산정 연구, 한국터널공학회 논문집, Vol. 7, No. 1, pp.37-49.
3. 유광호, 이민호, 박연준, 2007, 숏크리트 거동에 대한 갱도모형실험과 수치해석의 비교, 한국암반공학회, 춘계학술발표회, pp.112~121.
4. Itasca Consulting Group, Inc., 2006, FLAC-3D, Fast Lagrangian Analysis of Continua, Version 3.10, Itasca Consulting Group, Minneapolis, Minnesota, USA.